

女川原子力発電所2号炉 使用済燃料貯蔵ラック(燃料ラック)の 減衰定数について

設計基準対象施設について（第4条 地震による損傷の防止）

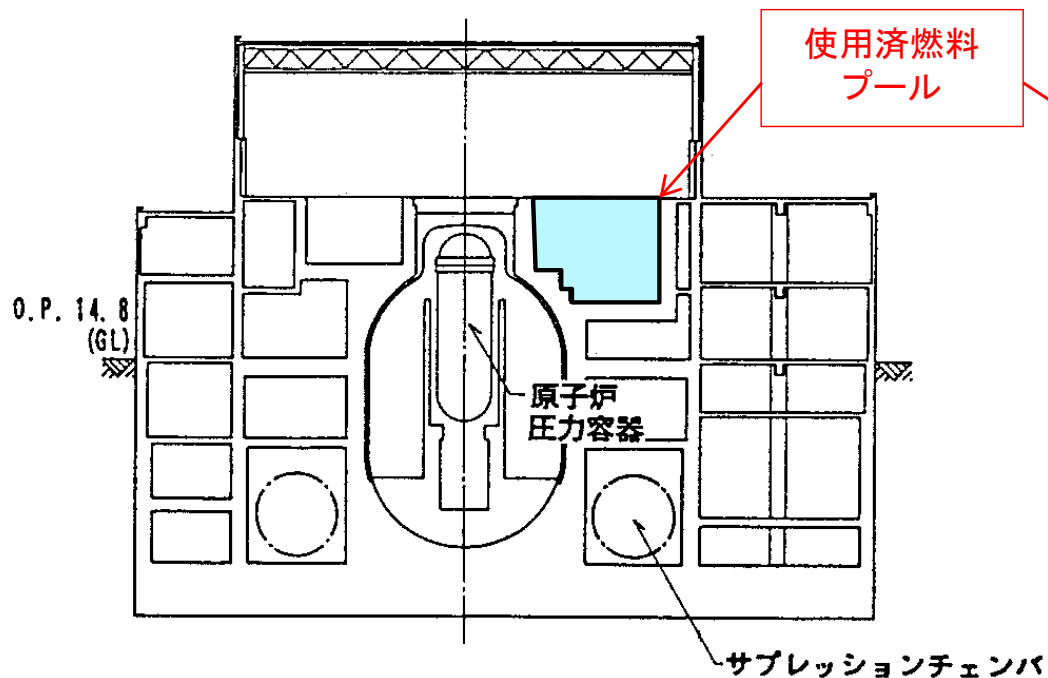
平成30年3月29日
東北電力株式会社

目次

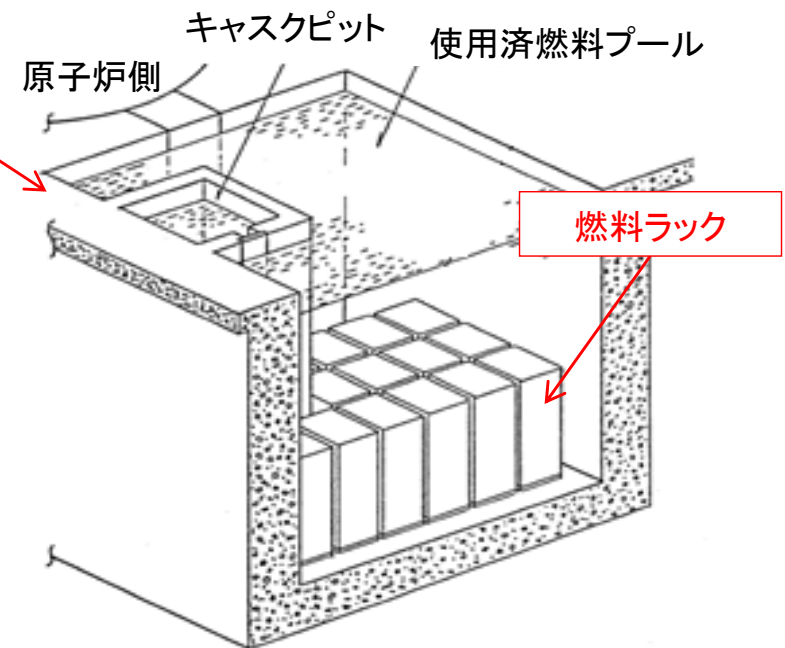
1. はじめに
2. 燃料ラックの概要及び既工認と今回工認の耐震設計手法の比較
 - 2.1 燃料ラックの構造と燃料プール内の配置
 - 2.2 既工認と今回工認の耐震設計手法の比較
 - 2.3 減衰定数を変更する目的と効果
3. 加振試験に基づく減衰定数設定の全体概要
4. 減衰特性の確認試験
 - 4.1 実物大加振試験の概要
 - 4.2 供試体ラックの水中加振試験装置及び試験手法について
 - 4.3 試験結果
 - 4.4 加振試験における試験条件の妥当性
 - 4.5 加振試験結果の実機への適用性
5. 試験結果に基づく燃料ラックの設計用減衰定数の設定
6. 結論

1. はじめに

- 女川2号炉の使用済燃料貯蔵ラック(燃料ラック)に対する既工認の耐震設計では、**設計用減衰定数**として「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1991 追補版」(JEAG4601)に規定される溶接構造物の**1.0%**を採用
- 実際の燃料ラックは、使用済燃料プール内に設置されており、燃料集合体を貯蔵していることから、**燃料集合体のガタつき、燃料集合体の着座部の摩擦、ラック内壁と燃料集合体の衝突及び水の抵抗により、運動エネルギーの消散が大きくなり、減衰定数1.0%より大きな減衰がある**と考えられる
- **女川2号炉の今回工認の耐震設計では、燃料ラックの設計用減衰定数を実物大加振試験(加振試験)の結果に基づき設定**
- 本資料は、**加振試験結果に対して女川2号炉の地震動条件及び燃料ラックの設計条件に応じた検討を行い、その上で設定した設計用減衰定数について、女川2号炉への適用性を説明するもの**



女川2号炉 原子炉建屋断面図(EW方向)



使用済燃料プールの概要図

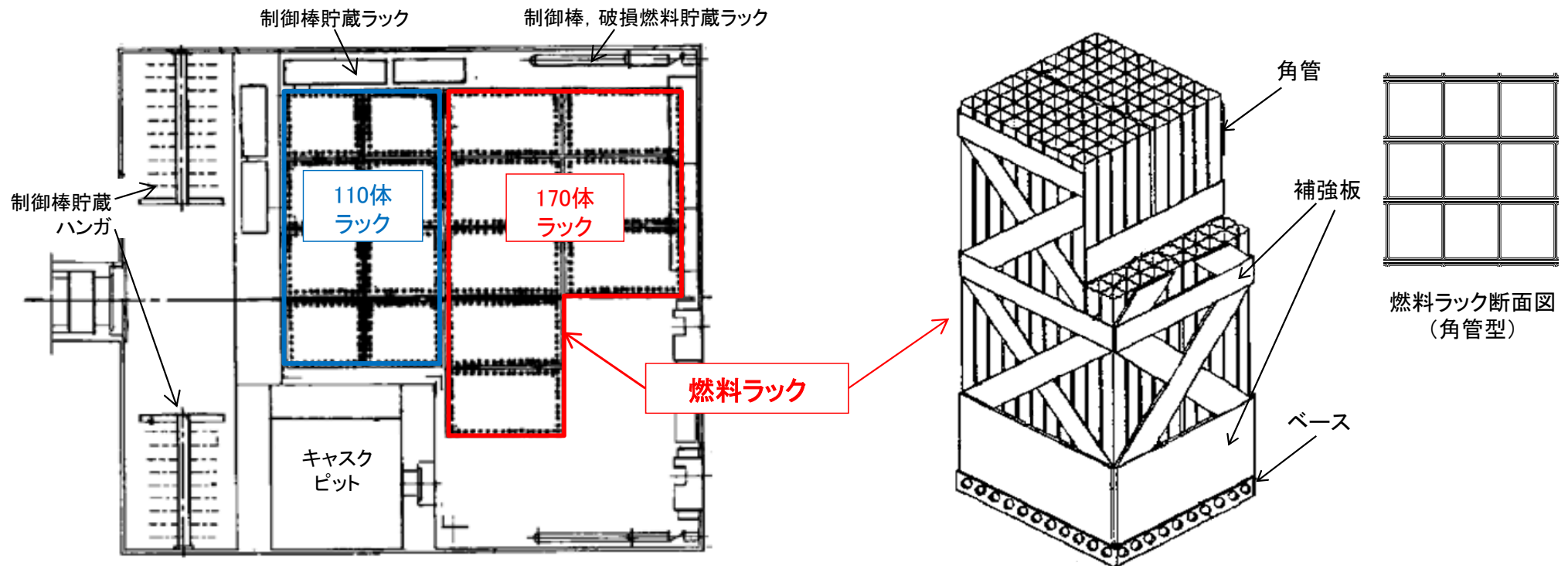
2. 燃料ラックの概要及び既工認と 今回工認の耐震設計手法の比較

2. 燃料ラックの概要及び既工認と今回工認の耐震設計手法の比較

2.1 燃料ラックの構造と燃料プール内の配置

- 女川2号炉の使用済燃料プールには、**角管型の燃料ラック**を設置
- 角管型の燃料ラックは、角管と補強板を溶接することで格子状のセルを構成
- 角管を10列×11列に配列した貯蔵体数**110体のラック**、10列×17列に配列した貯蔵体数**170体のラック**の2種類を8台ずつ設置

プラント	設置場所	ラック型式	耐震クラス	貯蔵体数	貯蔵列数	台数
女川2号炉	使用済燃料プール	角管型	S	110体	10列×11列	8台
				170体	10列×17列	8台



使用済燃料プールの平面図

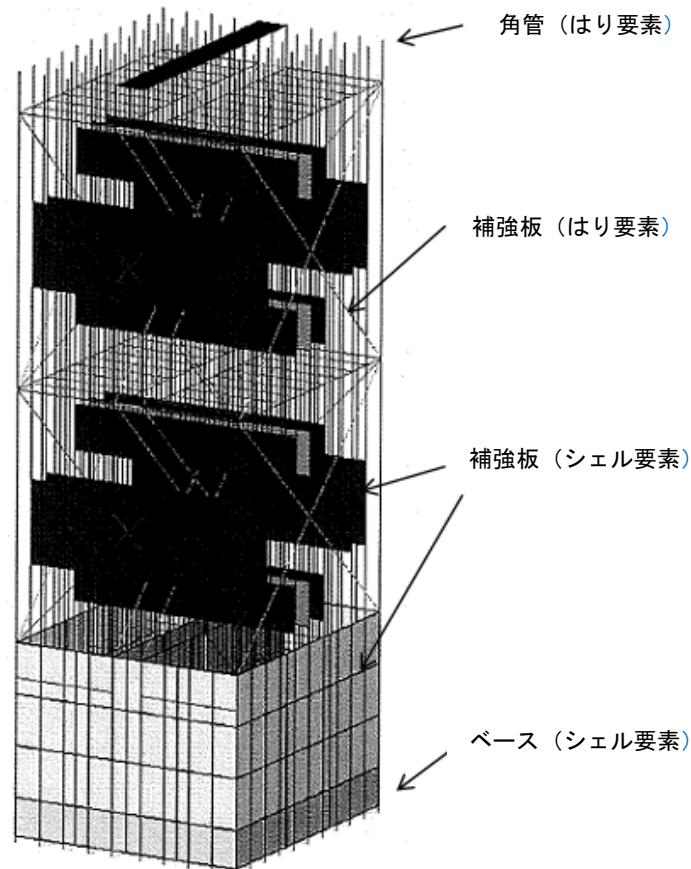
構造概要図(110体ラックの例)

2. 燃料ラックの概要及び既工認と今回工認の耐震設計手法の比較

2.2 既工認と今回工認の耐震設計手法の比較

- 燃料ラックの構成部材(角管, 補強板, ベース)を, はり要素及びシェル要素にてモデル化した3次元有限要素モデル(FEMモデル)
- 質量は, 燃料ラック自身の質量, 燃料集合体の質量, 燃料ラックに含まれる水の質量及び流体の付加質量を考慮
- スペクトルモーダル解析による最大応答加速度から, 部材に作用する最大荷重を算出して応力を評価
- 各部の許容応力はJEAG4601・補-1984に規定されている「その他の支持構造物」の許容応力を適用
- 女川2号炉の燃料ラックの耐震設計における**既工認からの変更は設計用減衰定数のみ**

女川2号炉 燃料ラックの耐震設計における既工認と今回工認手法の比較



女川2号炉 燃料ラック工認モデル

項目		既工認手法	今回工認手法
解析モデル		3次元有限要素モデル	同左
耐震解析手法	水平	スペクトルモーダル解析	同左
	鉛直	静的解析	同左(剛構造のため)
設計用減衰定数	水平	1.0 %	Ss, Sd: 7.0 %
	鉛直	—	—
許容応力		JEAG4601	同左
地盤・建屋等の不確実さの考慮		床応答スペクトルの周期方向へ±10%拡幅	同左
モデルの考え方		<ul style="list-style-type: none"> 剛性は燃料ラック本体の寸法及びヤング率より設定 質量は燃料ラック本体, 燃料集合体, 水及び付加質量を考慮 	同左

2. 燃料ラックの概要及び既工認と今回工認の耐震設計手法の比較

2.3 減衰定数を変更する目的と効果

- **既工認**における設計用減衰定数は、JEAG4601に規定される溶接構造物の**1.0%を採用**
- 地震時の燃料ラックの挙動を把握するため、**実機を模擬した加振試験を実施した結果**、既工認では考慮されていなかった、**より大きな減衰効果が見込まれる**ことを確認
- これらの知見に基づいて、**より現実に近い燃料ラックの挙動を模擬した評価を実施することを目的に**、**今回工認**の耐震設計では、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対する**女川2号炉の燃料ラックの設計用減衰定数として7.0%を採用**
- 本設計用減衰定数を用いて、既工認で許容値に対する発生応力の割合が最も大きい燃料ラックの構造強度評価を実施する場合、**応力の発生値が低減する見込み**

女川2号炉 設計用減衰定数と応答加速度

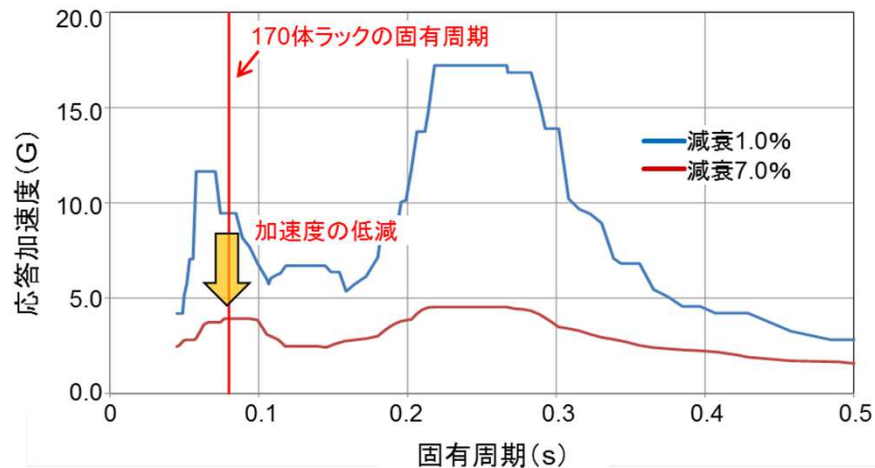
設計用減衰定数	応答加速度 (G)
1.0 %	9.46
7.0 %	3.93

女川2号炉 燃料ラック(170体)の評価結果*1

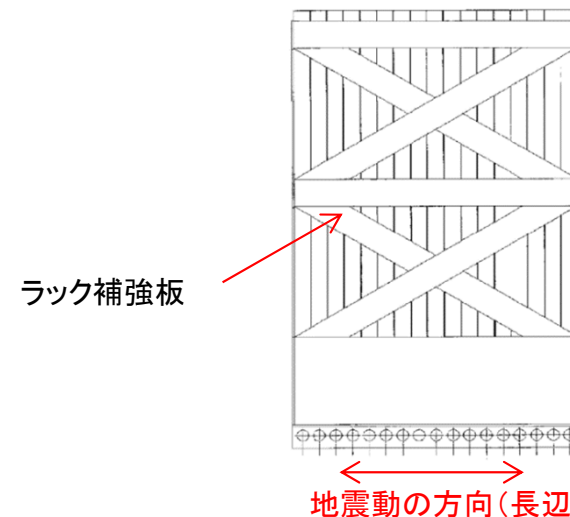
評価部位	計算値 (MPa)*2		評価基準値 (MPa)
	減衰1.0% (既工認)	減衰7.0% (今回工認)	
ラック補強板 (組合せ応力)	385	160	205

* 1: 平成25年12月設置変更許可申請時基準地震動 S_s

* 2: 暫定条件による概算値(解析値)



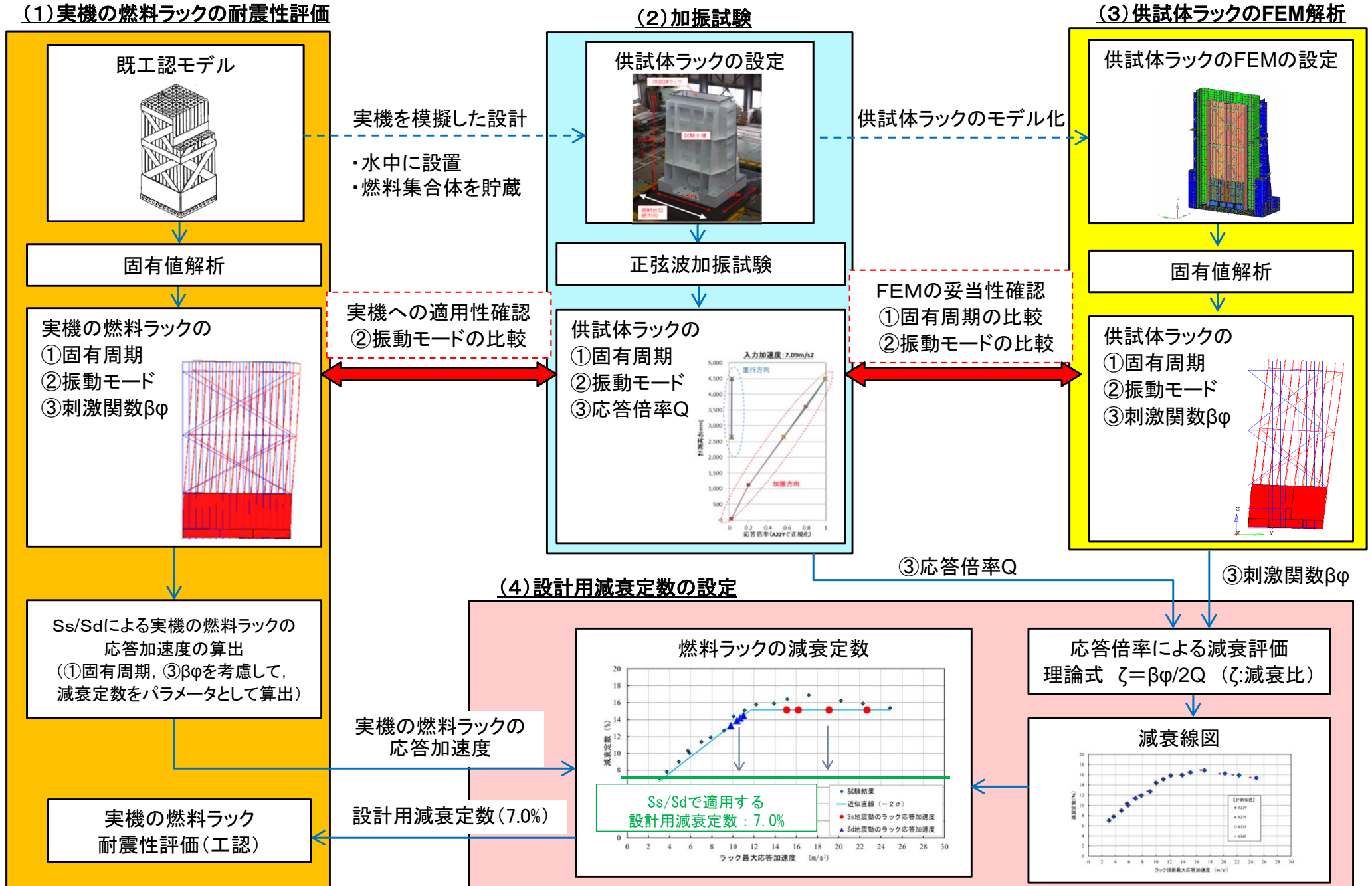
設計用減衰定数に応じた応答加速度



応答加速度の変化に伴う最小裕度部位の応答低減

3. 加振試験に基づく減衰定数設定の全体概要

3. 加振試験に基づく減衰定数設定の全体概要



4. 減衰特性の確認試験

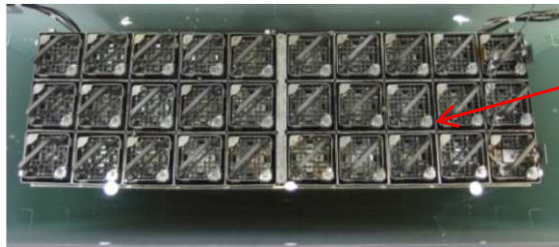
4. 減衰特性の確認試験

4.1 実物加振試験の概要

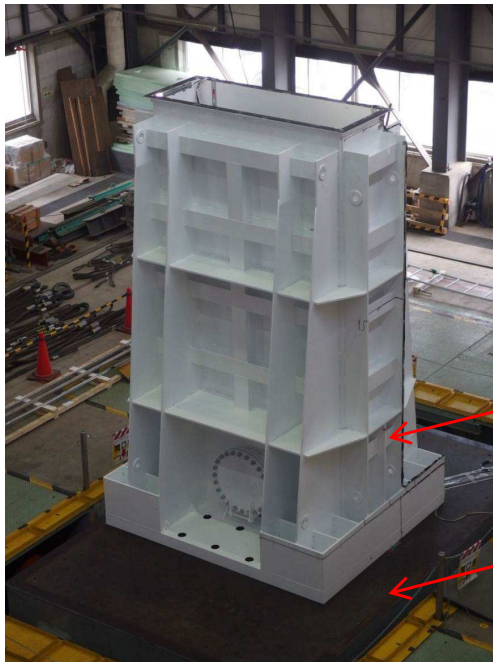
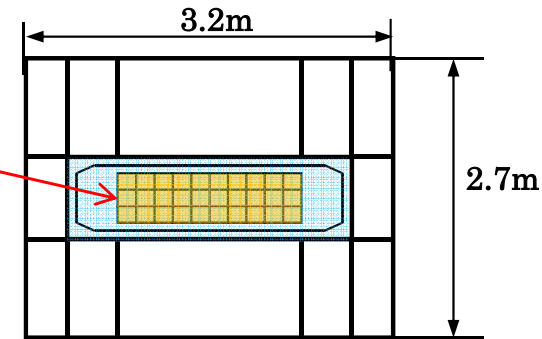
【試験体制】 東北電力(株)－(株)東芝(現 東芝エネルギーシステムズ(株))

【試験時期】 2014年4～5月

【試験場所】 (株)安藤・間 技術研究所(茨城県つくば市苅間515-1)



模擬燃料集合体

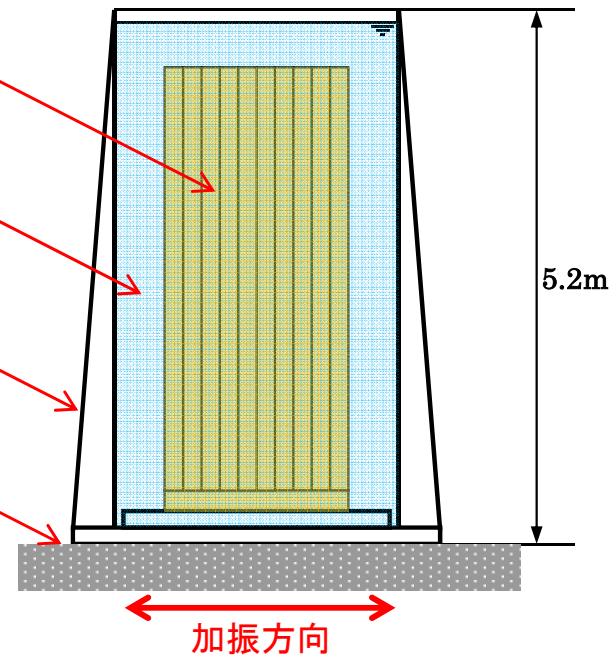


供試体ラック

水

試験水槽

振動台



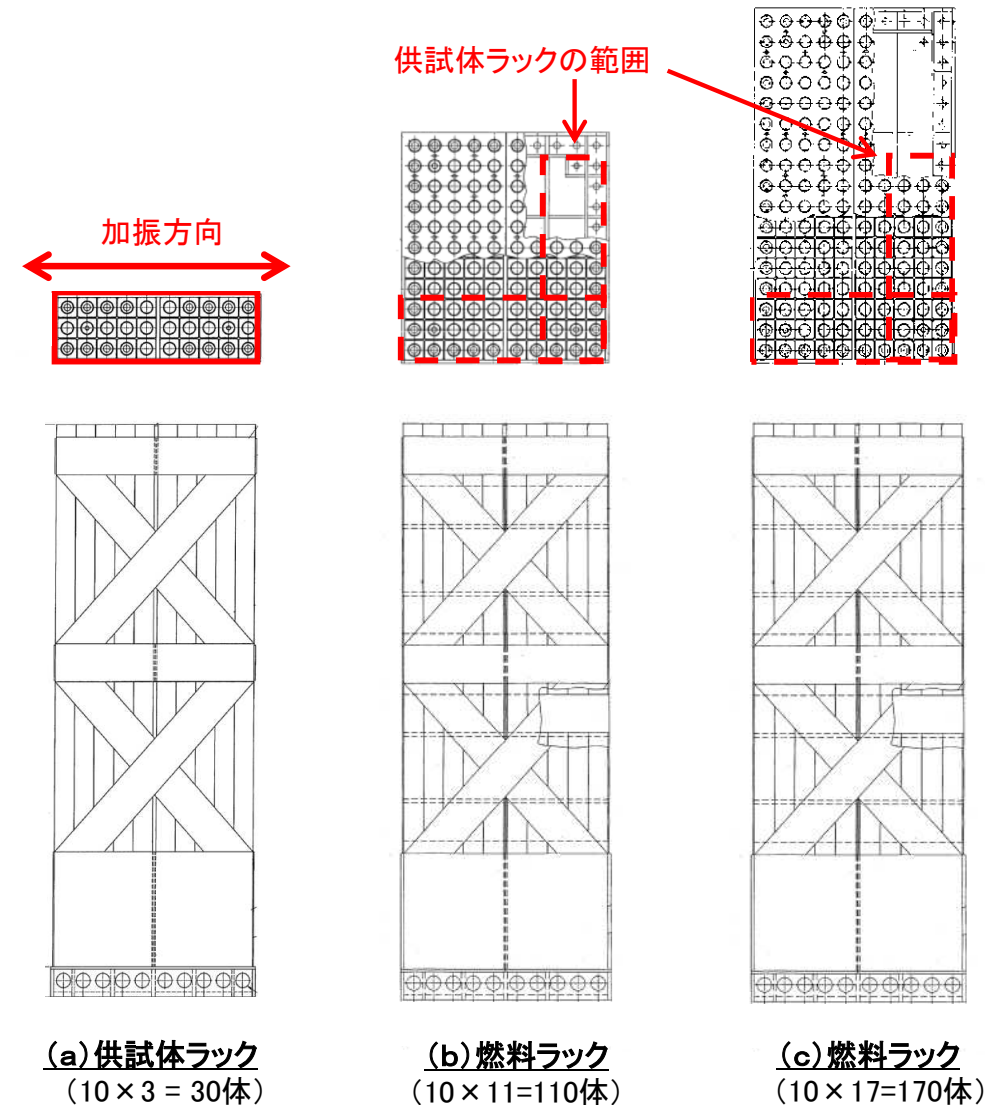
燃料ラックの加振試験装置の概観

4. 減衰特性の確認試験

4.2 供試体ラックの水中加振試験装置及び試験手法について(1)

(1) 供試体ラック

- 供試体ラックの寸法等は、実機の燃料ラックと同等となるように設定した
- 燃料ラックの減衰効果は、燃料集合体の増加に伴い大きくなると考えられることから、実機の燃料ラックに対して供試体ラックの貯蔵体数が少なくなるように設定した
- 加振方向の列数を実機の燃料ラックの最小貯蔵列数である10列、その直交方向を加振装置の制約を考慮し3列として、30体貯蔵(10×3列)の供試体ラックとした
- 供試体ラックは、実機の燃料ラックと振動モードが同等となるように設計した



4. 減衰特性の確認試験

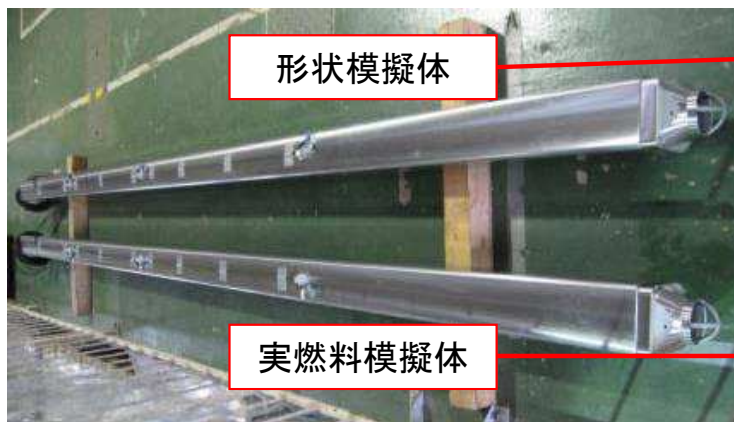
4.2 供試体ラックの水中加振試験装置及び試験手法について(2)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。

(2) 模擬燃料集合体

- 供試体ラックに貯蔵する模擬燃料集合体は、**実燃料模擬体と形状模擬体**の2種類
- 実燃料模擬体：鉛で質量を一致させた燃料ペレット以外は、実機の燃料集合体と同一の構成部品を使用したもの(1体)
- 形状模擬体：外形を構成する部品(上下部タイプレート、チャンネルボックス及びチャンネルファスナ)を実機と同一とし、全体質量をウェイトで模擬したもの(29体)
- いずれの模擬燃料集合体も、**実機の燃料集合体と形状、質量及び振動特性が同様**になるように製作

模擬燃料集合体
の外観

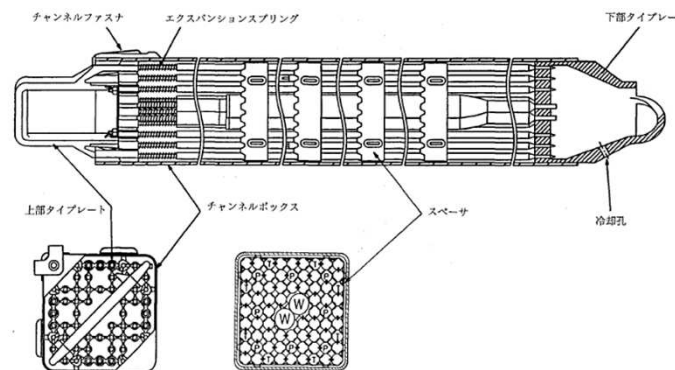


模擬燃料集合体の比較

項目	試験(模擬燃料集合体)		実機 (燃料集合体)
	実燃料模擬体	形状模擬体	8×8燃料*2
長さ(mm)	4,470	4,470	4,468
断面寸法*1(mm)	□137.54	□137.54	□137.54
質量(kg)	約300	約300	約300
材質	SUS及びZr材	SUS及びZr材	SUS及びZr材

*1 チャンネルボックス外形寸法

*2 燃料ラックに貯蔵されている燃料集合体のうち、最も質量が大きいもの



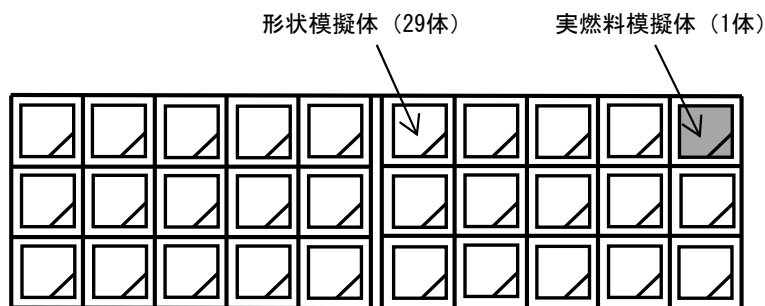
模擬燃料集合体の構造

4. 減衰特性の確認試験

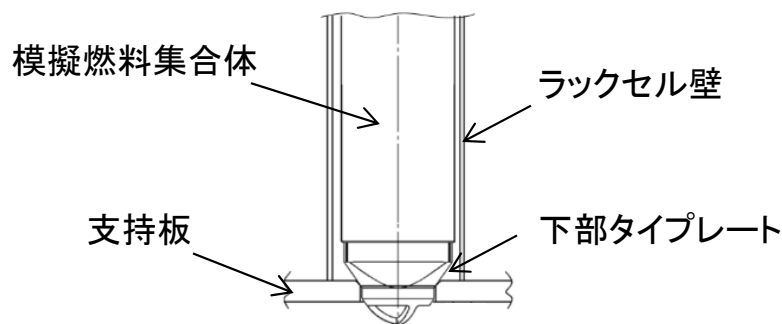
4.2 供試体ラックの水中加振試験装置及び試験手法について(3)

(3) 模擬燃料集合体の配置方法

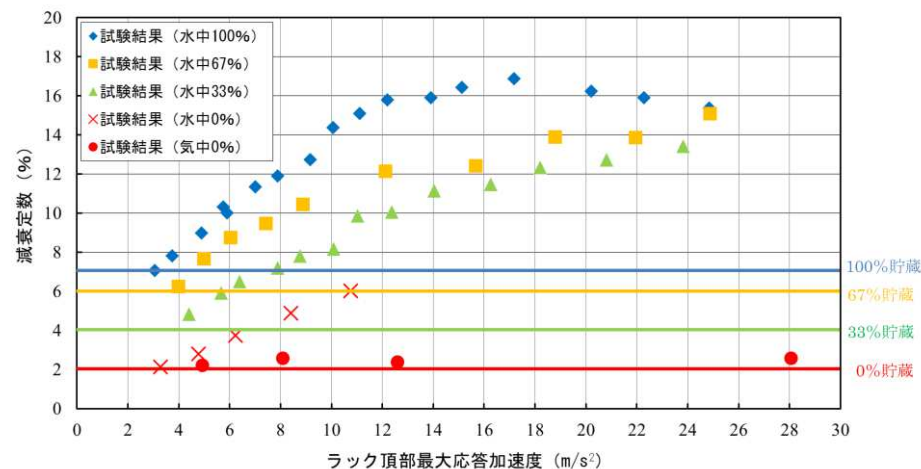
- 加振試験は、実燃料模擬体と形状模擬体を貯蔵して実施（形状、質量及び振動特性が同様）
- 模擬燃料集合体の貯蔵体数は、燃料ラックの構造強度評価において**発生応力が最も厳しい設計条件となる100%貯蔵条件**にて加振試験を実施
- 模擬燃料集合体の**設置状態は、実機と同様**になるように設定



模擬燃料集合体の配置



模擬燃料集合体の設置状態



燃料貯蔵率と減衰定数の関係

燃料貯蔵率と発生応力の関係

燃料貯蔵率 (貯蔵体数)	減衰定数 (%) ^{*1}	総重量 (ton)	発生応力 (MPa) ^{*2}	許容応力 (MPa)
100% (170体)	7.0	82.8	160	205
67% (113体)	6.0	67.9	146	205
33% (57体)	4.0	53.1	142	205
0% (0体)	2.0	38.5	124	205

*1: 試験結果からの仮定

*2: ラック補強板の組合せ応力

4.2 供試体ラックの水中加振試験装置及び試験手法について(4)

(4) 実機と供試体等の主要緒元比較

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。

比較項目		実機	供試体等	実機への適用性
ラック	ラックセルの型式	角管型	同左	実機と同一
	ラックの支持形式	ボルトによる床固定式	同左	
		自立型	同左	
	貯蔵体数	110体(10×11) 170体(10×17)	30体(10×3)	供試体ラックは、流体及び燃料集合体による減衰効果が実機よりも小さいと考えられるラックを選定
	ラックセル頂部と燃料の最小隙間			実機と同一
	ラックから壁までの距離	約300～2,700mm	約150～430mm	流体による減衰効果が十分に小さくなるよう設定した
	ラックセル高さ			実機と同一
	ラックセルのピッチ			
	ラックセルの厚さ			
ラックセルの材質	B-SUS	SUS304	材料特性はほぼ同等であるためラック全体の減衰効果へ与える影響は十分に小さいと考えられる	
燃料集合体	燃料タイプ	8×8燃料	模擬燃料集合体	実機と同等
	質量	約300kg	約300kg	実機と同一
	外形寸法	147.3mm	同左	
	チャンネルボックス材質	ジルカロイ-4	同左	
	チャンネルボックス厚さ			
燃料プール	水深	約12m	約5m	高さ(水深)は実機と異なるが、供試体ラックの振動特性に与える影響が十分に小さいことを確認した

4. 減衰特性の確認試験

4.2 供試体ラックの水中加振試験装置及び試験手法について(5)

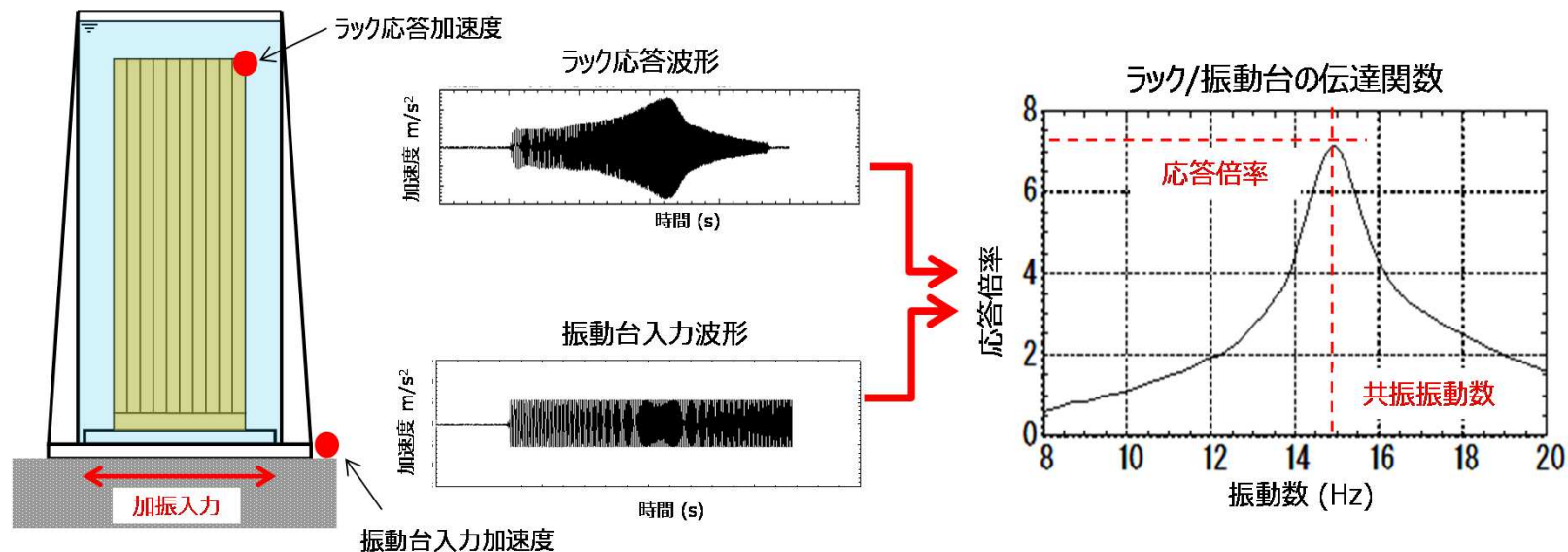
(5) 試験方法

- 振動台に試験水槽を設置し、水中の供試体ラックに模擬燃料集合体を貯蔵した状態において加振試験を実施
- 正弦波による掃引試験を実施し、振動台上の加速度及び供試体ラック頂部の応答加速度から求めた伝達関数から、応答倍率を求めて振動特性を評価
- 供試体ラックの応答加速度に対する減衰定数の変化を確認するため、入力加速度をパラメータとして計17ケースの試験を実施

加振試験における入力条件

試験方法	加振方向	振動数範囲 (Hz)	入力加速度* (m/s ²)	入力加速度ケース数
正弦波掃引試験	長辺	8~20	0.42~7.09	17

* 振動台上の実測加速度(最大値)



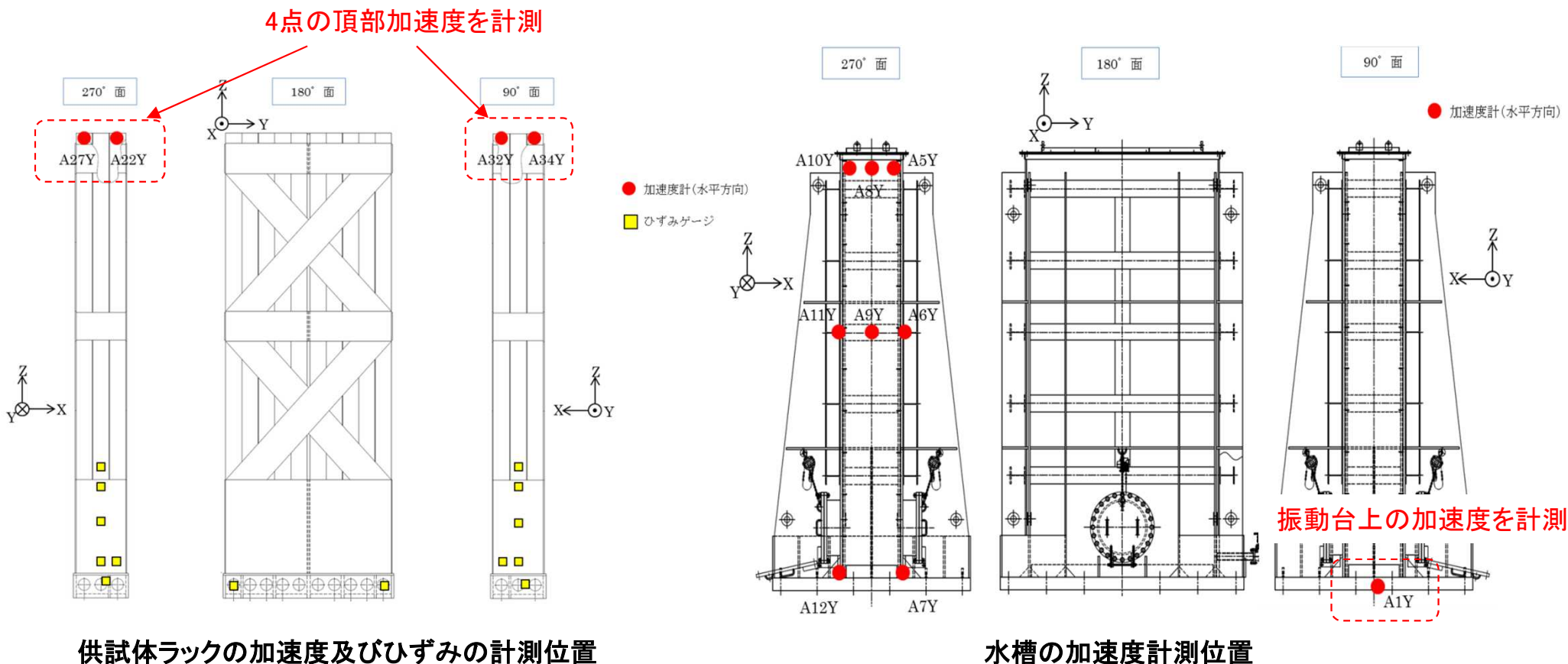
加振試験による応答倍率評価の概要

4. 減衰特性の確認試験

4.2 供試体ラックの水中加振試験装置及び試験手法について(6)

(6) 加速度の計測方法

- 供試体ラックの伝達関数を求めるため、**供試体ラック頂部に4台、振動台上に1台の加速度計を設置し**、加速度を計測
- 供試体ラック中間部及び基部にひずみゲージを設置し、供試体ラックが弾性範囲内で加振されていることを確認
- 試験水槽は剛構造で設計しており、試験水槽が剛体として挙動し、供試体ラックへ影響を与えないことを確認



4. 減衰特性の確認試験

4.3 試験結果(1)

(1) 試験結果に基づく減衰の算出方法

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。

- 各入力加速度ケースにおける供試体ラックの共振振動数における**応答倍率から減衰定数を評価**
- 今回の加振試験は、入力加速度が比較的大きいため、燃料集合体のガタつき、燃料集合体の着座部の摩擦、ラックと燃料集合体の衝突・摩擦などによる供試体ラックの非線形挙動が強くなると考えられることから、応答倍率から精緻に減衰定数を算出できると考えられる本手法を採用

【応答倍率による減衰定数の評価式】

地動に対する1自由度系の運動方程式より、応答倍率の最大値が1/2となることから、これを多自由度系に展開し、供試体ラックの振動モード及び流体質量を考慮した刺激関数 $\beta \phi$ により減衰定数を評価

$$\xi = \frac{\beta \phi}{2Q}$$

ξ : 減衰定数

β : 刺激係数 *1

ϕ : 固有モードベクトル *1

Q : 応答倍率 *2

*1: FEM固有値解析より算定

*2: 加振試験より算定

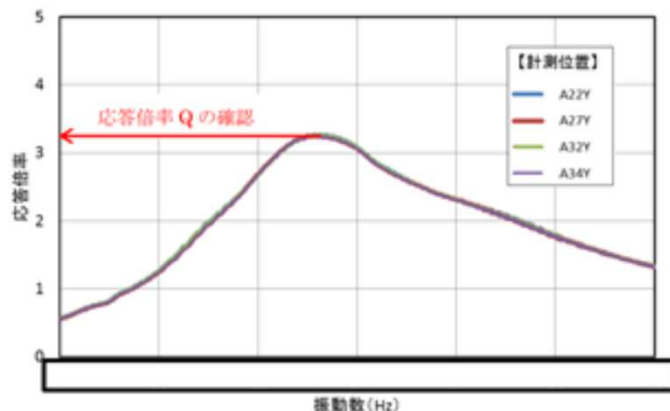
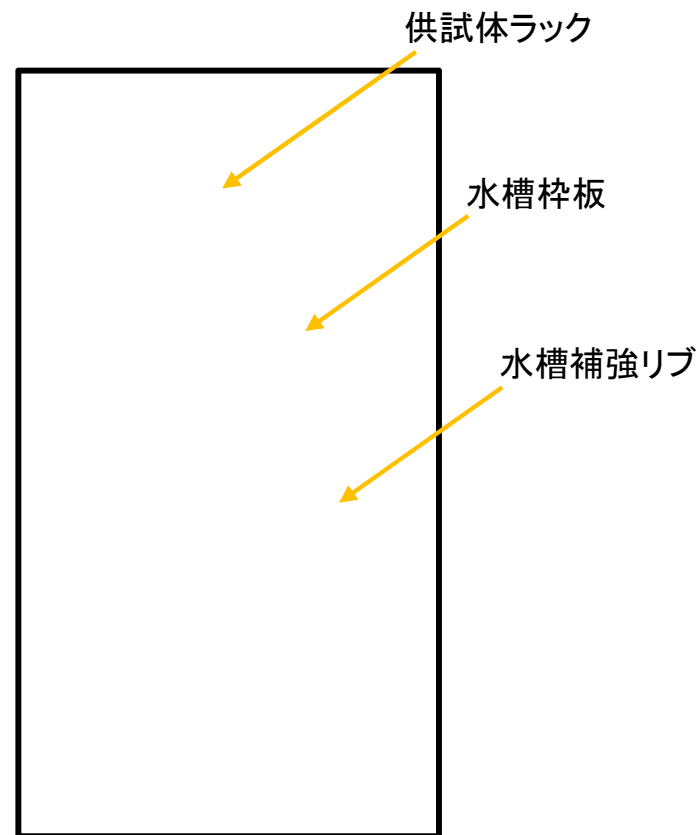


図 20 伝達関数 (入力加速度最大ケース 7.09m/s²)

加振試験による伝達関数



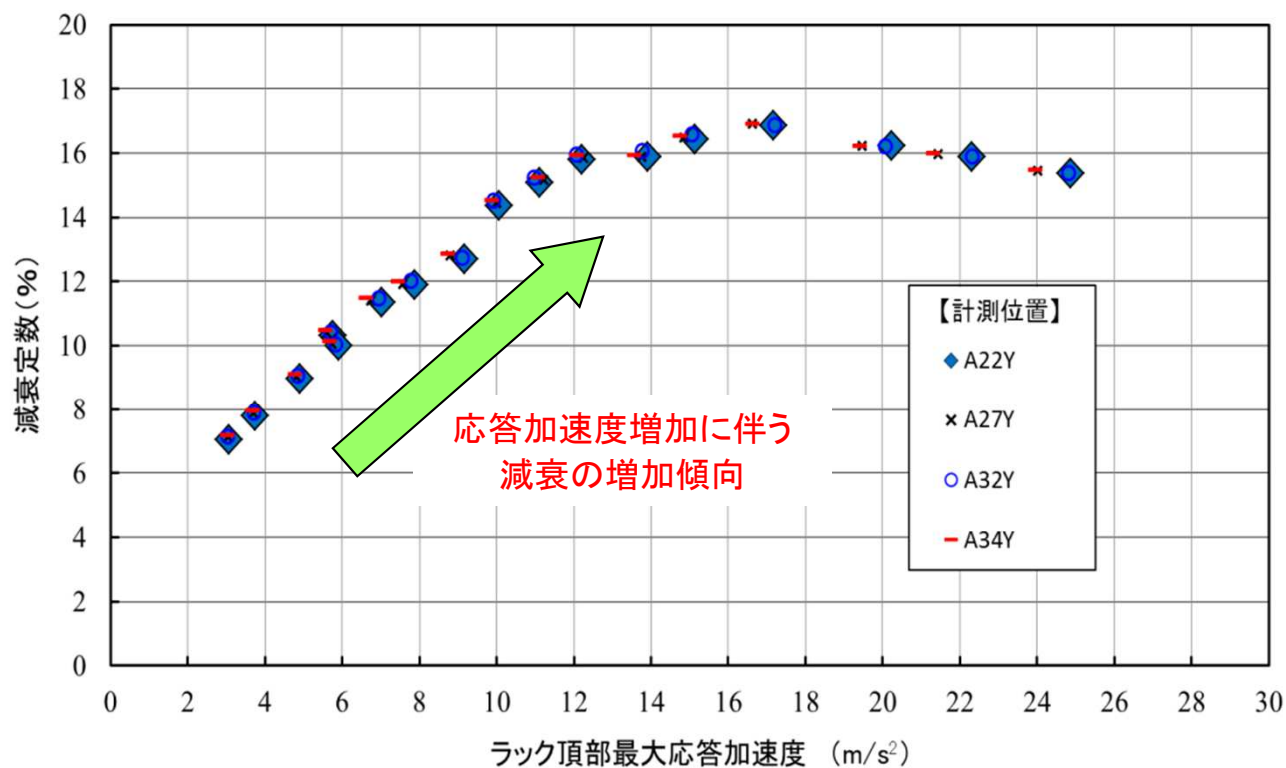
供試体ラックのFEMモデル

4. 減衰特性の確認試験

4.3 試験結果(2)

(2) 減衰特性の評価結果

- 減衰定数は、供試体ラック頂部の応答加速度の増加に伴い増加する傾向
- 既工認で適用している設計用減衰定数の1%よりも、大きな減衰効果を示す(最大で約17%)ことを確認

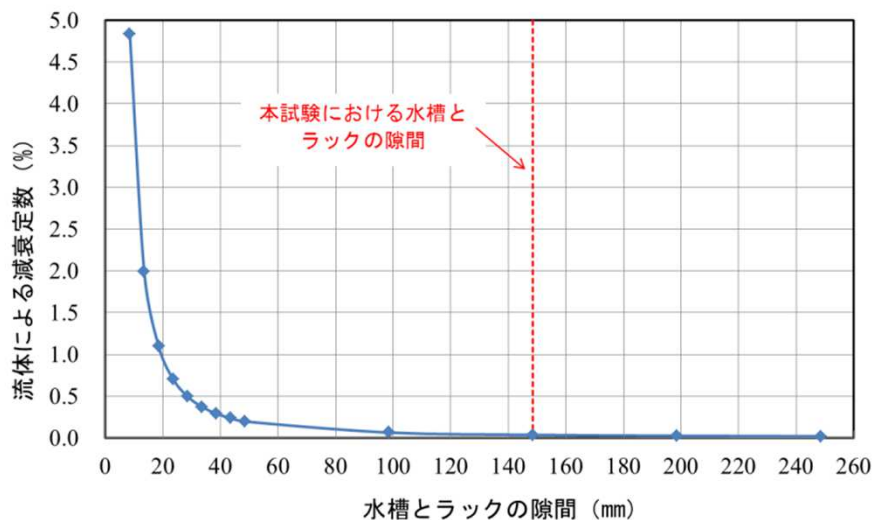


供試体ラックにおける応答加速度と減衰定数の関係

4. 減衰特性の確認試験

4.4 加振試験における試験条件の妥当性

- 供試体ラックの主要諸元及び試験水槽の大きさは、女川2号炉の実機及び実機環境と同等、又は実機と比較して減衰定数が小さくなるように設定
- 試験水槽は剛構造とし、試験水槽の寸法(ラックとの隙間)が供試体ラックの減衰定数に影響を与えないことを確認
- 試験水槽の水深が供試体ラックの振動特性に与える影響が小さいことを確認
- 供試体ラックと女川2号炉の実機の燃料ラックの振動モードが同等であることを確認(4.5にて説明)
- 加振試験は水槽内でスロッシングが励起されない条件で実施(スロッシングが供試体ラックの減衰定数に影響を与えない)
- 以上より、本試験で得られた減衰定数を女川2号炉の実機の燃料ラックの耐震設計へ適用することは妥当と考えられる



水槽とラックの隙間による流体減衰の影響

水深による固有振動数の比較

水深(m)	固有振動数(Hz)	備考
11.5		実機水深
4.9		試験水深

試験水槽のスロッシング固有周期及び加振周期

試験	
試験水槽のスロッシング固有周期	加振周期
1.8 秒	0.050~0.125 秒

4. 減衰特性の確認試験

4.5 加振試験結果の実機への適用性(1)

(1) FEM解析に基づく振動モードの確認

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。

- 燃料ラック及び供試体ラックの振動モードは、いずれも同様にせん断モードが支配的であり、その直交方向の振動はほとんど励起されていない
- 供試体ラックと女川2号炉の実機の燃料ラックの振動モードが同等であり、供試体ラックは実機の燃料ラックの振動挙動を適切に模擬

ラック種類	燃料ラック(工認モデル)				供試体ラック
	110体ラック(10列×11列)		170体ラック(10列×17列)		30体ラック(10列×3列)
モード形状	せん断モード	せん断モード	せん断モード	せん断モード	せん断モード
固有振動数					
平面図					
側面図					

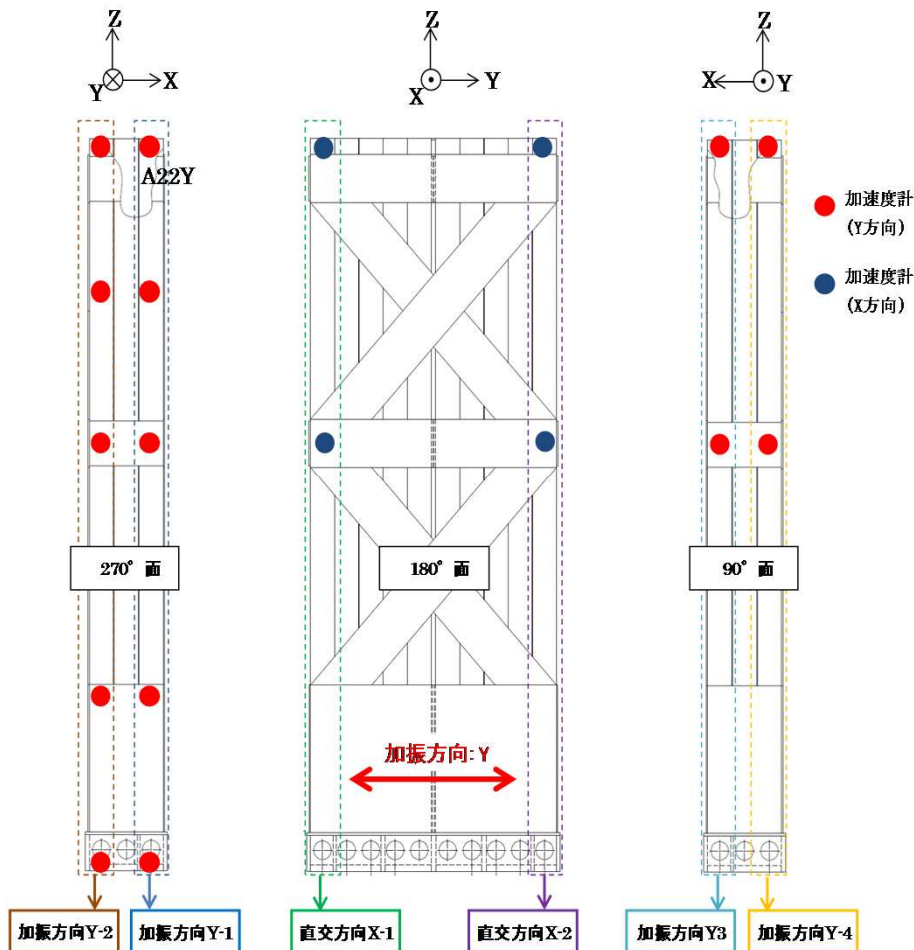
4. 減衰特性の確認試験

4.5 加振試験結果の実機への適用性(2)

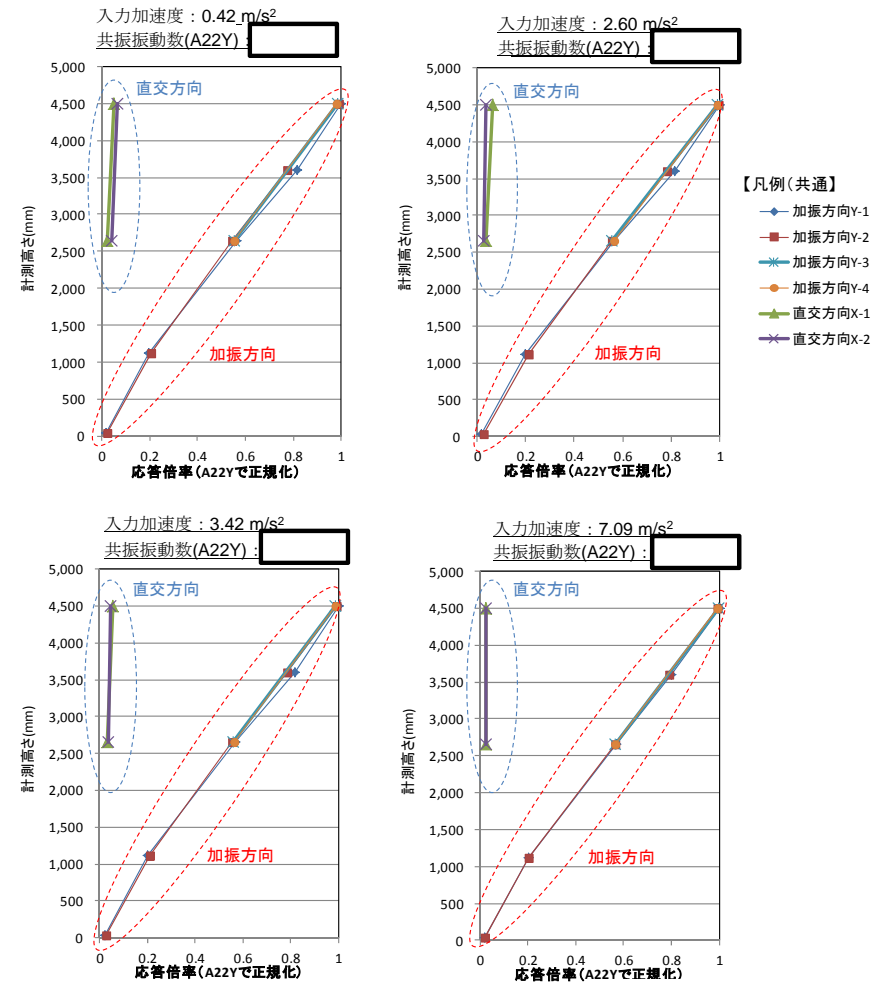
(2) 加振試験結果に基づく振動モードの確認

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。

- 加振試験で得られた各測定位置の応答倍率を用いて、加振方向(Y方向)及び加振直交方向(X方向)の振動モードにより、**供試体ラックの3次元的な応答を確認**
- 加振試験における**供試体の振動モードは、加振方向に対するせん断モードが支配的**であり、その直交方向の振動はほとんど励起されておらず、また、**いずれの入力加速度ケースにおいても振動モードはよく一致している**



供試体ラックの加速度計等設置位置



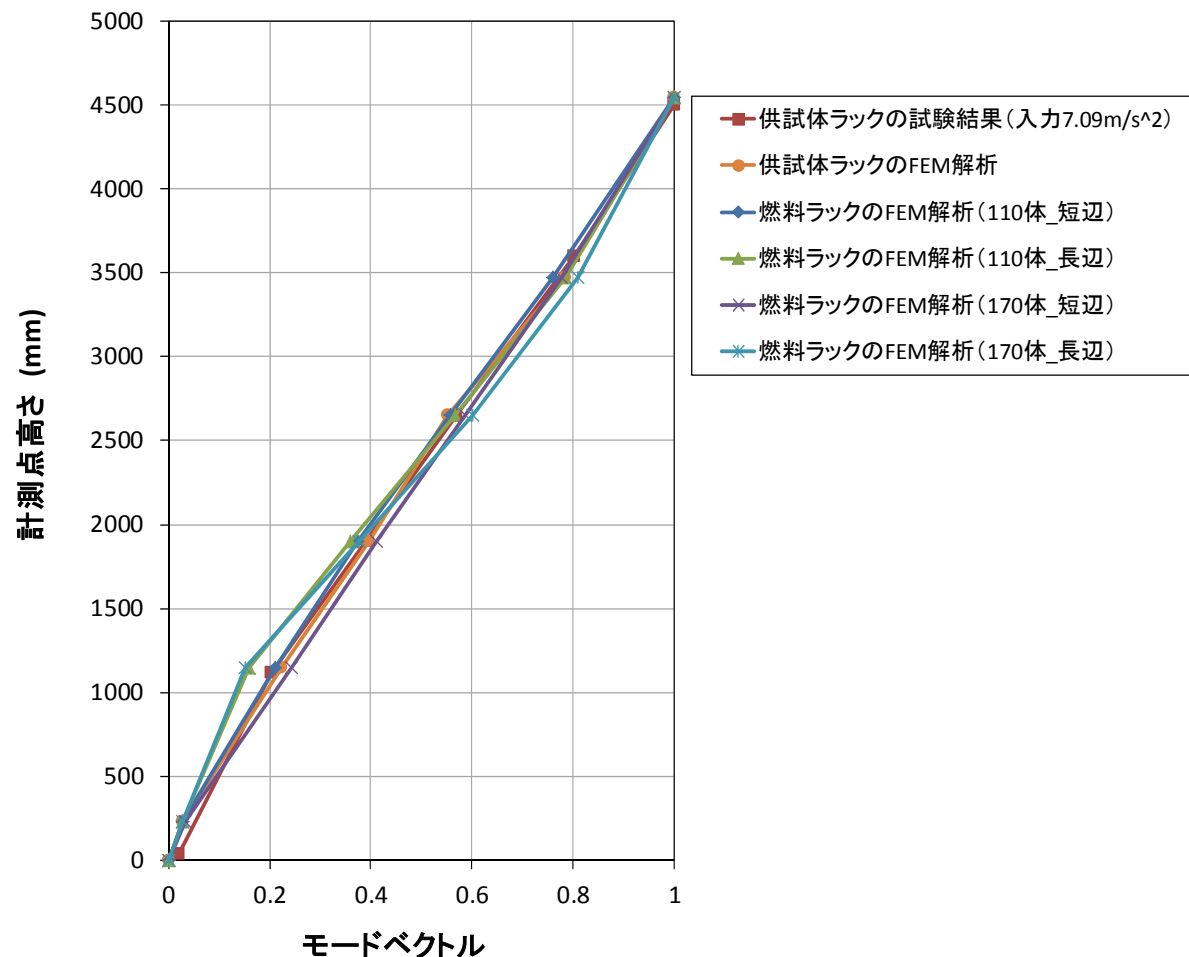
加振試験における振動モードの比較

4. 減衰特性の確認試験

4.5 加振試験結果の実機への適用性(3)

(3) FEM解析及び加振試験結果に基づく振動モードの確認

- 女川2号炉の燃料ラック及び供試体ラックのFEM解析による振動モードと、供試体ラックの加振試験結果による振動モードを比較した結果、女川2号炉の燃料ラックと供試体ラックの振動モードはよく一致していることを確認



FEM(女川2号炉の燃料ラック及び供試体ラック)と加振試験(供試体ラック)の振動モードの比較

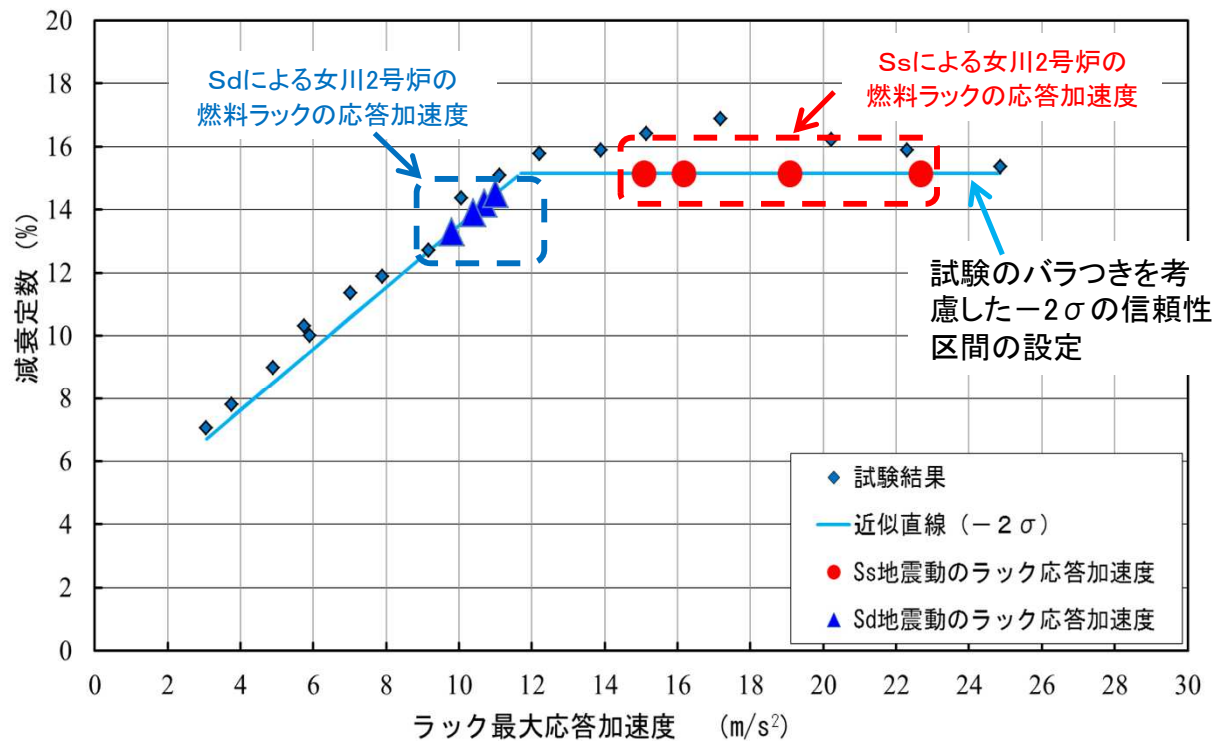
5. 試験結果に基づく燃料ラックの 設計用減衰定数の設定

5. 試験結果に基づく燃料ラックの設計用減衰定数の設定(1)

- 供試体ラックの減衰定数には応答依存性があることを確認したことから、女川2号炉の燃料ラックの耐震設計に適用する設計用減衰定数を設定するため、評価用地震動(Ss/Sd)に対する燃料ラックの応答加速度を確認
- 供試体ラックと燃料ラックの応答加速度の比較に当たっては、各試験ケースで得られた4点の加速度計による減衰のうち下限値を代表とし、さらに-2σ(95%)の信頼性区間の直線近似を設定の上、女川2号炉の燃料ラックの応答加速度と比較
- 基準地震動Ss相当に対する女川2号炉の燃料ラックの応答加速度レベルにおける減衰定数は約15%、弾性設計用地震動Sd相当に対する減衰定数は約13~14%であることを確認

女川2号炉の燃料ラックの加速度レベルの確認

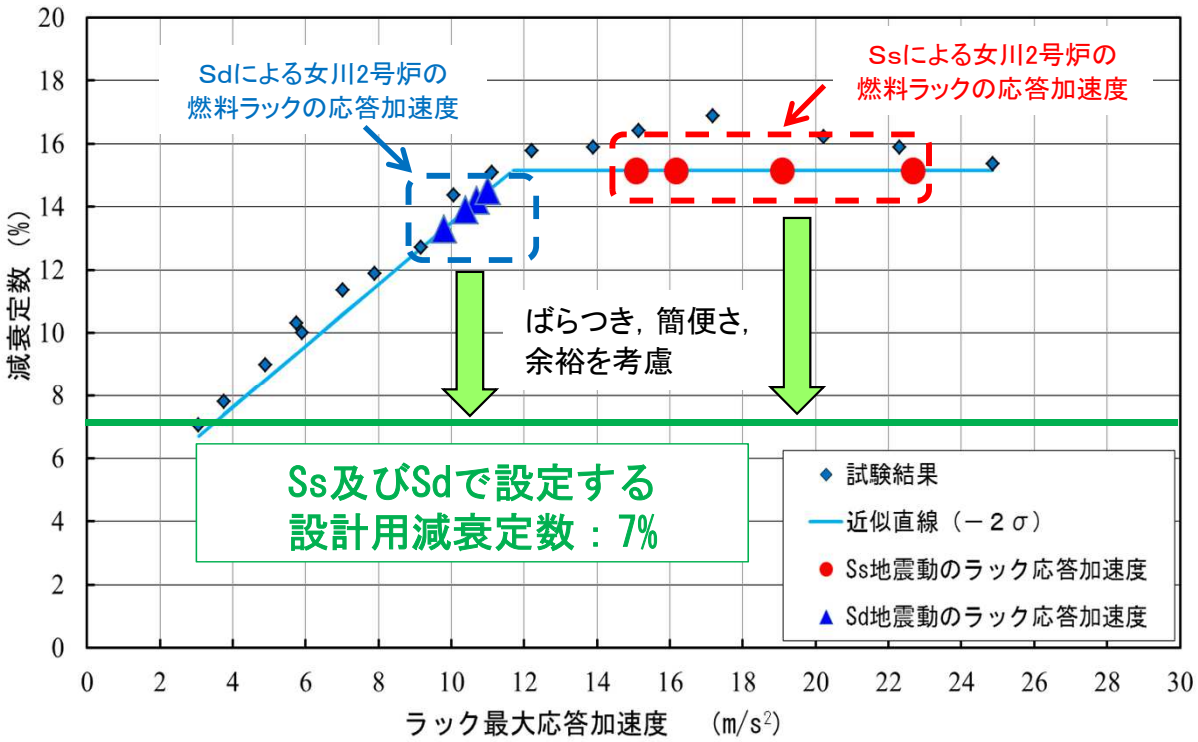
地震動	ラック種類	方向	固有周期 (s)	最大応答加速度 (m/s ²)	減衰定数 (%)
基準地震動 Ss相当	110体	短辺		19.1	15.1
		長辺		16.2	15.1
	170体	短辺		22.7	15.1
		長辺		15.1	15.1
弾性設計用地震動 Sd相当	110体	短辺		11.0	14.5
		長辺		10.4	13.9
	170体	短辺		10.7	14.2
		長辺		9.8	13.3



女川2号炉の燃料ラックの設計用減衰定数の設定

5. 試験結果に基づく燃料ラックの設計用減衰定数の設定(2)

➤ 女川2号炉の今回工認の耐震設計に適用する設計用減衰定数は、試験結果のばらつき、耐震設計の簡便さと余裕を考慮して、燃料ラックの種類(角管110/170体)、燃料貯蔵率及び評価用地震動(S_s/S_d)によらず一律7.0%を採用する



女川2号炉の燃料ラックの設計用減衰定数の設定

6. 結論

- 実物大の供試体ラックによる加振試験を実施した結果、既工認の設計用減衰定数1.0%よりも大きな減衰効果（最大で17%）があることを確認
- 加振試験は、女川2号炉の実機の燃料ラックと同等な供試体ラックを用いて、女川2号炉の実機環境（水中）と同等な試験条件で実施
- 女川2号炉の実機の燃料ラックと供試体ラックの振動特性が同様であることを確認し、試験結果を女川2号炉の燃料ラックの耐震評価に適用することの妥当性を確認
- 女川2号炉の今回工認の燃料ラックの耐震設計では、加振試験で得られた結果に対して余裕を考慮して、基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d の評価において設計用減衰定数として7.0%を採用する